

УДК 669.71

**А. Г. Мочуговский<sup>\*</sup>, Р. Ю. Барков, А. В. Поздняков, А. В. Михайловская**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва<sup>\*</sup>*mochugovskiy@mail.ru***ОСОБЕННОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ  $L_{12}$ -ФАЗЫ В СПЛАВАХ Al–Mg–ПМ/РЗМ**

Исследование посвящено особенностям распада пересыщенного твердого раствора и его влиянию на механические свойства и эволюцию структуры в сплавах системы Al–Mg с малыми добавками переходных металлов. Установлено, что в магналиях выделение  $L_{12}$ -фазы  $Al_3Zr$  может происходить по прерывистому и непрерывному механизмам. Двухступенчатая термообработка ускоряет распад, а добавка Er увеличивает прочность сплавов. Показано, что в сплавах с Mn низкотемпературный отжиг способствует формированию дисперсных квазикристаллов, что положительно сказывается на механических свойствах деформированных полуфабрикатов

*Ключевые слова:* дисперсоиды,  $L_{12}$ -фаза, прерывистый распад, непрерывный распад, алюминиевые сплавы, квазикристаллы

**A. G. Mochugovskiy, R.Yu. Barkov, A. V. Pozdniakov, A. V. Mikhailovskaya****THE  $L_{12}$ -PHASE PRECIPITATION IN AL–MG–TM/REM ALLOYS**

The study aims to analyze the precipitation of  $L_{12}$ -phases and its effect on the structure and mechanical properties of Al–Mg–TM/REM alloys. It was determined that the discontinuous and continuous precipitation mechanisms of  $Al_3Zr$   $L_{12}$ -phase are possible at low Zr concentrations. The two-stage heat treatment accelerates the precipitation, whereas the addition of Er increases the strength of alloys. It is shown that the low-temperature annealing provides the formation of Mn-bearing nano-scale quasicrystals that increase the mechanical properties of Al-based alloys.

*Key words:* dispersoids,  $L_{12}$ -phase, continuous precipitation, discontinuous precipitation, quasicrystals

**А**люминиевые сплавы являются перспективными конструкционными материалами для различных отраслей промышленности. Тем не менее, значения прочностных характеристик даже наиболее

прочных алюминиевых сплавов зачастую недостаточны для реализации ряда технических задач, ввиду чего повышение прочности сплавов остается одной из наиболее важных проблем алюминиевой отрасли. Один из наиболее перспективных способов упрочнения алюминиевых сплавов основан на введении в их состав малых добавок переходных (ПМ) и редкоземельных (РЗМ) металлов, таких как Sc, Zr, Er, Mn, V и пр. Максимальная растворимость этих элементов в алюминии при равновесных условиях, как правило, не превосходит десятых долей процента даже при подсолидусных температурах. Повысить растворимость ПМ и РЗМ в алюминии удастся посредством ускоренной кристаллизации слитков, в процессе которой происходит формирование аномально пересыщенных твердых растворов. Последующая термообработка литых заготовок обеспечивает распад неравновесных твердых растворов с образованием наноразмерных частиц алюминидов ПМ и РЗМ. Эти выделения, или дисперсоиды, способствуют увеличению прочности, стабильности зеренной структуры и других эксплуатационных характеристик сплавов. На сегодняшний день скандий является наиболее эффективным дисперсоидообразующим элементом. Однако высокая стоимость скандия накладывает значительные ограничения на его промышленное применение. Таким образом, существует необходимость в более экономичных, но сравнимых со скандием по эффективности аналогов. Подбор аналогов подразумевает разработку режимов термической обработки, позволяющих максимально реализовать потенциал добавок за счет формирования дисперсоидов с минимальным размером и наибольшей плотностью распределения в объеме слитка.

В данной работе проанализированы кинетика и механизмы распада пересыщенного твердого раствора в сплавах Al–Mg, легированных Zr, Mn, Sc и Er в интервале температур 360...460 °С. Выявлено влияние режимов отжига на параметры зеренной структуры и механические свойства листовых заготовок. Установлено, что несмотря на сравнительно низкое содержание циркония 0,25 масс. %, в магналиях возможно образование  $L1_2$ -фаз не только по непрерывному механизму распада с образованием компактных дисперсоидов, но и по прерывистому механизму с формированием веерообразных агломератов у границ зерен (рис.). Показано, что двухступенчатая термообработка цирконий содержащих слитков формирует высокую плотность равномерно распределенных  $L1_2$  дисперсоидов среднего размера 7 нм, образован-

ных по непрерывному механизму распада, обеспечивая практически нерекристаллизованную структуру при отжиге холоднокатаных листов до температуры  $0,9 T_{пл}$ . При этом в сплаве Al–Mg–Zr двухступенчатая гомогенизация обеспечивает на 15–20 % более высокие значения прочностных характеристик по сравнению с кратковременными одноступенчатыми режимами [1]. Легирование сплава 0,25 % Er приводит к дополнительному увеличению предела текучести на 10 % [2].

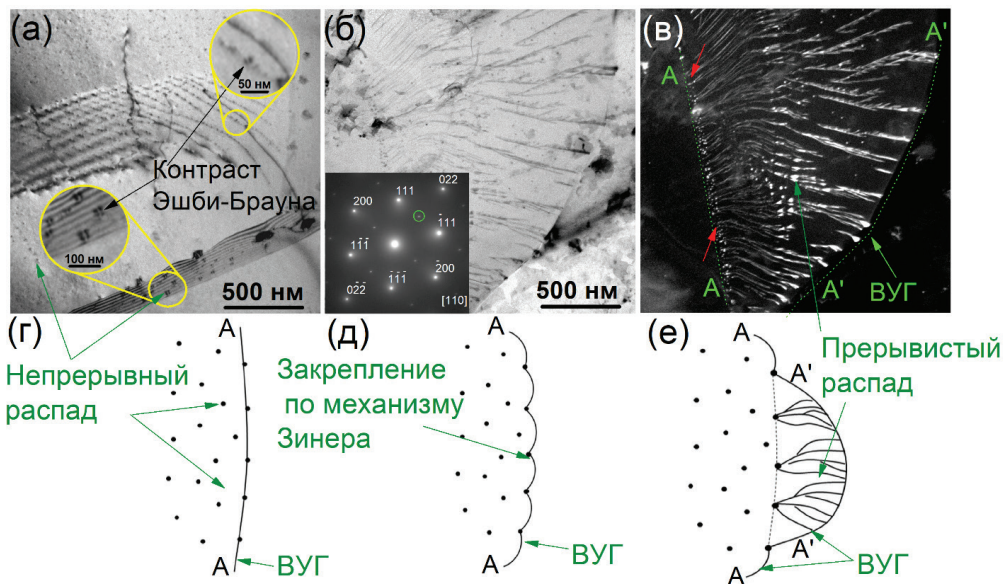


Рис. Тонкая структура образцов, отожженных: по двухступенчатому режиму  $360^{\circ}\text{C}$  (32 ч) с последующим отжигом при  $420^{\circ}\text{C}$  (8 ч); (а, б) светлое поле; (в) темное поле для (б); ВУГ — высокоугловая граница; Дифракционный рефлекс, из которого получено темнополое изображение, помечен окружностью (вставка в (б)); схема (г–е) механизма распада; А-А — начальная позиция ВУГ, А'-А' — позиция ВУГ после завершения прерывистого распада

Установлено, что в сплавах Al–Mg, содержащих 1,0...1,2 % Mn, замена типично используемого высокотемпературного режима гомогенизации на низкотемпературный при  $360^{\circ}\text{C}$  приводит к формированию компактных выделений квазикристаллической икосаэдрической фазы с размерами 17...70 нм, благодаря чему повышается температура начала рекристаллизации и прочностные характеристики листовых заготовок [3].

### **Литература**

1. Precipitation behaviour of  $L1_2$   $Al_3Zr$  phase in Al–Mg–Zr alloy / A. V. Mikhaylovskaya [et al.] // Mat. Char., 139 (2018). P. 30–37.
2. Precipitation kinetics of  $L1_2$  phase in Al–Mg–Er–Zr alloy / A. G. Mochugovskiy [et al.] // Mat. Sci. Eng. A 744 (2019). P. 195–205.
3. Annealing induced precipitation of nanoscale icosahedral quasicrystals in aluminum based alloy / A. G. Mochugovskiy [et al.] // Materials Letters, 247 (2019). P. 200–203.